Projekt: bd0782
Projekttitel: SHARP
Federführende Wissenschaftlerin: Sabine Brinkop
Berichtszeitraum: 01.11.2025 - 31.10.2026

Für folgende Themen wurden im Antrag zum Jahr 2026 Computing Ressourcen beantragt:

1. Stratosphärischer Wasserdampf in verschiedenen Simulationen des ESCiMO-Projekts (id0853)
2. Effekte des Weltraumtransports auf die Atmosphäre
3. Vulkanausbruch des Hunga-Tonga

Stratosphärischer Wasserdampf in verschiedenen Simulationen des ESCiMO-Projekts (id0853)

Stratosphärischer Wasserdampf (SWV) spielt eine Schlüsselrolle in der Chemie der Stratosphäre. Schwerpunkt in diesem Projekt (-Unterpunkt) war und ist die Analyse von stratosphärischem Wasserdampf (SWV) in den verschiedenen ESCiMO-Simulationen (DKRZ-Project id0853) mit dem Ziel einer Publikation. Im letzten Antragszeitraum war es geplant die Publikation abzuschließen. Dieses Ziel wurde jedoch in 2026 nicht erreicht und ist jetzt für 2027 geplant.

Effekte des Weltraumtransports auf die Atmosphäre

In einer Masterarbeit wurde die Erweiterung von MADE3 (Aerosolsubmodell) für die Stratosphäre untersucht. Dabei wurden verschiedene Ansätze zur Ergänzung von Schwefelsäureevaporation implementiert und im Box-Modell analysiert. Zudem wurden auch weitere nötige Anpassungen an MADE3 vorgenommen, um ein konsistentes Modellsetup für die Stratosphäre zu erhalten. Die Masterarbeit wurde im Septemeber 2026 an der LMU eingereicht (Paetzold, 2026). Zur weiteren Analyse im 3D Modell wurde eine Referenzsimulation für weitere QCTM-Simulationen (mit und ohne Evaporation) durchgeführt. Der QCTM-Ansatz (Quasi-Chemistry Transport model mode, Deckert et al., 2011) wurde gewählt, um die Analyse zu vereinfachen und die Simulationszeiträume zu verkürzen und so die benötigte Rechenzeit zu verringern. Diese QCTM-Simulationen wurden mittlerweile gestartet und sollen bis zum Ende dieses Jahres fertig sein. Im Anschluss folgt die Analyse, um das neue Simulationssetup zu evaluieren und ggf. zu verbessern.

Für die Untersuchung von Transportzeiten von Aerosolpartikeln steht ein erstes Emissionsinventar zur Verfügung. Da die Simulation noch um ein weiteres Submodell, das für die entsprechenden Simulationen angepasst werden muss, ergänzt werden soll, wird der Simulationsstart erst gegen Ende 2026 erfolgen.

Die Bewertung der atmosphärischen und klimatischen Auswirkungen von Raketenstarts wurde mithilfe des Chemie-Klima-Modells EMAC in Angriff genommen. Als Fallstudie diente ein Emissionsinventar, das auf mit Wasserstoff betriebenen, wiederverwendbaren Trägerraketen (130 Starts pro Jahr) basiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die mit Wasserstoff betriebenen Raketenstarts zu Veränderungen in der atmosphärischen Zusammensetzung führen, insbesondere bei H_2O, CH_4 und Ozon (Abb. 1). Die Ergebnisse wurden im Mai 2026 auf der Generalversammlung der EGU vorgestellt (Yamashita et al., 2026). Weitere Simulationen und Analysen werden derzeit durchgeführt, um die durch diese Raketenstarts verursachten Strahlungsantriebe zu untersuchen.

Im Jahr 2026 wurde ein weiteres Emissionsinventar für weltweite Raketenstarts entwickelt: das IGEL2024-Emissionsinventar (Herberhold et al., 2026). Die Konfigurationen des EMAC-Modells für die Simulationsläufe der globalen Szenarien – einschließlich Gas- und Partikelemissionen – werden derzeit fertiggestellt. Der Beginn der Simulationsläufe ist für das Jahr 2026 geplant.

Vulkanausbruch des Hunga-Tonga

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde die Umverteilung und der Abbau der durch die Hunga-Tonga–Hunga Ha'apai-Eruption (Januar 2022) injizierten Wasserdampf-Perturbation (rund 150 Tg) sowie deren dynamische Rückkopplungen untersucht. Grundlage der Analyse sind fünf Paare freilaufender gestörter und ungestörter EMAC-Simulationen (T42, 90 vertikale Ebenen bis 0,01 hPa, 2022–2031). Die gestörten Läufe beinhalten ausschließlich die H_2O-Injektion ohne SO_2- oder Aerosol-Forcing, sodass die Antwort auf die Wasserdampf-Perturbation isoliert wird. Die Masterarbeit wurde im September 2026 an der LMU eingereicht (Habermann, 2026) und eine Veröffentlichung der Ergebnisse ist geplant.

Der global integrierte H_2O-Überschuss (1–70 hPa) zeigt eine e-folding time von 2,71 Jahren; eine Rückkehr in den Bereich der natürlichen Variabilität wird im Modell gegen 2028 projiziert. Eine neu entwickelte tropopausebezogene

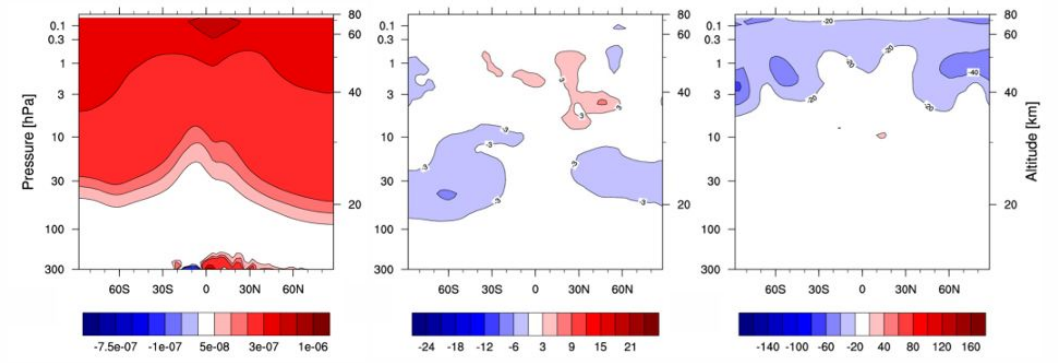


Abbildung 1: Mehrjähriger (2010–2014) zonaler Mittelwert der Störungen von (links) H_2O (kg/kg), (mitte) CH_4 (ppbv) und (rechts) Ozon (ppbv), die durch den Start von mit Wasserstoff betriebenen Raketen verursacht wurden. Die Differenzen werden als Ergebnis der gestörten Simulation abzüglich der Basissimulation dargestellt.

Burden-Definition mit breitenabhängiger unterer Grenze identifiziert einen rapiden südlichen Transport, eine verzögerte Eintragung in den antarktischen Polarwirbel und eine Austrocknung im australischen Winter 2023.

Dynamische Rückkopplungen wurden auf zwei Zeitskalen nachgewiesen. In der Injektionsregion führt der erhöhte Wasserdampf zu einer radiativen Abkühlung, die über den TEM-thermodynamischen Zusammenhang mit einer anomalen residualen Abwärtsbewegung verbunden ist. Ein passiver Tracer bestätigt, dass diese Zirkulationsantwort die tropische Retention erhöht und den meridionalen Export verzögert. Bis zum australischen Winter 2022 entwickelt sich eine polare Abkühlung von über 10 K, begleitet von einer Verstärkung und äquatorwärtigen Verschiebung des antarktischen Polarwirbels (Westwind-Anomalien > 30 m s^{-1}). Die Ergebnisse werden durch veränderte planetare Wellenaktivität und schwächere residuale Abwärtsbewegung dynamisch konsistent erklärt.

Ab Mitte 2023 verzögert sich die QBO-artige Tropenwindoszillation in den gestörten Läufen gegenüber den Kontrollläufen. Die verzögerte Phase ist zeitlich konsistent mit dem Erreichen der oberen Stratosphäre und des unteren Mesosphärenbereichs durch H_2O, wo verstärkter HO_x-abhängiger Ozonabbau die Kurzwellenaufheizung umverteilt. Diese Ergebnisse werden als gekoppelte Anpassung von Ozon, radiativer Heizung, residualer Zirkulation, Wellenforcing und äquatorialem Zonalwind interpretiert.

References within the project:

Habermann, L.: Umverteilung der Hunga-Tonga-Wasserdampfperturbation in der mittleren Atmosphäre und ihre dynamischen Rückkopplungen in einem Chemie-Klima-Modell, Masterarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2026.

Moritz Herberhold, Jascha Wilken, Steffen Callsen, Matthias Nützel, Hiroshi Yamashita, Martin Sippel and Simona Silvestri: Inventory of global emissions by launchers for 2024, Nature Scientific Data (submitted).

Paetzold: Stratospheric Extension of the MADE3 Submodel, Masterarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2026.

Yamashita, H., Nützel, M., Schmidt, A., Herberhold, M., Wilken, J., and Maiwald, V.: Quantifying the atmospheric and climatic effects of reusable, hydrogen-fueled rocket launches, EGU General Assembly 2026, Vienna, Austria, 3–8 May 2026, EGU26-17205, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-17205, 2026.

Other references:

Deckert, R., Jöckel, P., Grewe, V., Gottschaldt, K.-D., and Hoor, P.: A quasi chemistry-transport model mode for EMAC, Geosci. Model Dev., 4, 195–206, https://doi.org/10.5194/gmd-4-195-2011, 2011